

ISSN 1411-240X  
Nomor : 402/AU2/P2MI-LIPI/04/2012  
(Masa berlaku Akreditasi s/d April 2015)

Verifikasi Paket Program MVP II dan.....  
(Jati Susilo)

## VERIFIKASI PAKET PROGRAM MVP-II DAN SRAC2006 PADA KASUS TERAS REAKTOR VERA BENCHMARK

Jati Susilo  
Pusat Teknologi Dan Keselamatan Reaktor Nuklir  
Email: [shushilo@batan.go.id](mailto:shushilo@batan.go.id)

Diterima editor 4 April 2014  
Disetujui untuk publikasi 26 Mei 2014

### ABSTRAK

**VERIFIKASI PAKET PROGRAM MVP-II DAN SRAC2006 PADA KASUS TERAS REAKTOR VERA BENCHMARK.** Dalam penelitian ini dilakukan verifikasi perhitungan *benchmark* VERA pada kasus *Zero Power Physical Test* (ZPPT) teras reaktor Watts Bar 1. Reaktor tersebut merupakan jenis PWR kelas 1000 MWe yang didesain oleh Westinghouse, tersusun dari 193 perangkat bahan bakar  $17 \times 17$  dengan 3 jenis pengkayaan  $\text{UO}_2$  yaitu 2,1wt%, 2,619wt% dan 3,1wt%. Perhitungan nilai k-eff dan distribusi faktor daya dilakukan pada siklus operasi pertama teras dengan kondisi *beginning of cycle* (BOC) dan *hot zero power* (HZP). Posisi batang kendali dibedakan menjadi *uncontrolled* (semua batang kendali berada di luar teras), dan *controlled* (batang kendali *Bank D* didalam teras). Paket program komputer yang digunakan dalam perhitungan adalah MVP-II dan SRAC2006 modul CITATION dengan data pustaka tampang lintang ENDF/B-VII.0. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perbedaan nilai k-eff teras pada kondisi *controlled* dan *uncontrolled* antara referensi dengan MVP-II (-0,07% dan -0,014%) dan SRAC2006 (0,92% dan 0,99%) sangat kecil atau masih dibawah 1%. Perbedaan faktor daya maksimum teras pada kondisi *controlled* dan *uncontrolled* dengan referensi dengan MVP-II adalah 0,38% dan 1,53%, sedangkan dengan SRAC2006 adalah 1,13% dan -2,45%. Dapat dikatakan bahwa kedua paket program komputer menunjukkan hasil perhitungan yang sesuai dengan nilai referensi. Dalam hal penentuan kekritisan teras, maka hasil perhitungan MVP-II lebih konservatif dibandingkan dengan SRAC2006.

Kata kunci : MVP-II, SRAC2006, PWR, VERA

### ABSTRACT

**VERIFICATION OF MVP-II AND SRAC2006 CODE TO THE CORE PHYSICS VERA BENCHMARK PROBLEM.** In this research, verification calculation for VERA core physics benchmark on the Zero Power Physical Test (ZPPT) of the nuclear reactor Watts Bar 1. The reactor is a 1000 MWe class of PWR designed by Westinghouse, arranged from 193 unit of  $17 \times 17$  fuel assembly consisting 3 type enrichment of  $\text{UO}_2$  that are 2.1wt%, 2.619wt% and 3.1wt%. Core power factor distribution and k-eff calculation has been done for the first cycle operation of the core at beginning of cycle (BOC) and hot zero power (HZP). In this calculation, MVP-II and CITATION module of SRAC2006 computer code has been used with ENDF/B-VII.0. cross section data library. Calculation result showed that differences value of k-eff for the core at controlled and uncontrolled condition between reference with MVP-II (-0,07% and -0,014%) and SRAC2006 (0,92% and 0,99%) are very small or below 1%. Differences value of radial power peaking factor at controlled and uncontrolled of the core between reference value with MVP-II are 0,38% and 1,53%, even though with SRAC2006 are 1,13% and -2,45%. It can be said that the calculation result by both computer code showing suitability with reference value. In order to determinate of criticality of the core, the calculation result using MVP-II code is more conservative compare with SRAC2006 code.

Key's word : MVP-II, SRAC2006, PWR, VERA

## PENDAHULUAN

Sebagai langkah awal untuk analisis keselamatan teras reaktor jenis PWR maka dilakukan kegiatan verifikasi, evaluasi dan validasi penggunaan paket program komputer yang akan digunakan sebagai alat perhitungan terhadap desain keselamatan fisika teras reaktor. Validasi, evaluasi dan verifikasi dapat dilakukan dengan perbandingan nilai parameter keselamatan baik hasil pengukuran melalui eksperimen maupun hasil perhitungan pada kasus *benchmark*. Parameter keselamatan fisika teras reaktor PWR yang dimaksud misalnya kekritisian (nilai keff) teras, distribusi faktor daya, reaktivitas batang kendali, parameter kinetika teras dan lain-lain. Oleh karena itu perhitungan *benchmark* banyak dilakukan oleh banyak kalangan peneliti pada berbagai macam bentuk teras reaktor dengan berbagai paket program komputer. Diantaranya adalah perhitungan kasus *benchmark* PWR yang dirilis oleh IAEA bentuk geometri 2-D dan 3-D masing-masing dengan paket program MILONGA[1] dan NESTLE[2], teras PWR dengan NODAL3[3], parameter kinetika teras VVER dengan CITATION[4], teras PWR eksperimental dengan PRIDE *code*[5], *benchmark* PWR dengan MCNP5[6], validasi CASMO-4/SIMULATE-3 terhadap data teras PWR Taiwan Power[7], validasi BOXER *code* terhadap data teras CROCUS[8], validasi Serpent-ARES *code* pada reaktor *benchmark* MIT-BEAVRS[9] dan lain-lain.

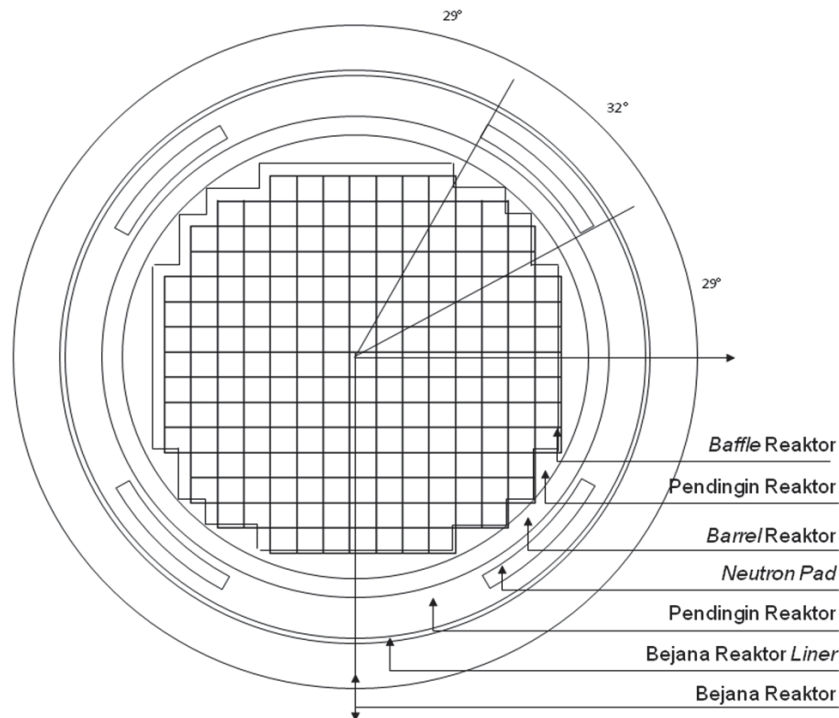
Salah satu kegiatan *benchmark* terhadap perhitungan fisika teras reaktor yaitu proyek VERA[10] (*Virtual Environment for Reactor Applications*) yang diprakarsai oleh CASL (*Consorsium for Advanced Simulation of LWRs*) dari *Advanced Modeling Applications, Oak Ridge National Laboratory, Nuclear Energy of Department Energy U.S.* Pada kegiatan tersebut dilakukan perhitungan beberapa kasus *benchmark* dengan menggunakan paket program komputer KENO-VI[11] dan dengan data pustaka tampang lintang ENDF/B-VII.0. Sebagai objek perhitungan adalah data siklus operasi pertama teras reaktor Watts Bar 1 pada kondisi *beginning of cycle* (BOC) dan *hot zero power* (HZIP). Watts Bar 1 merupakan teras reaktor jenis PWR kelas daya 1000 MWe yang didesain oleh Westinghouse, tersusun dari 193 perangkat bahan bakar  $17 \times 17$  dengan 3 jenis pengkayaan  $\text{UO}_2$  yaitu 2,1wt%, 2,619wt% dan 3,1wt%. Perhitungan kasus *benchmark* VERA dibagi dalam beberapa tahapan. Yaitu, perhitungan *pin cell* dan *fuel lattice* bentuk geometri dua dimensi, perangkat bahan bakar dan susunan perangkat bahan bakar  $3 \times 3$ , *Zero Power Physical Test* (ZPPT) teras reaktor, teras reaktor bentuk geometri tiga dimensi kondisi xenon setimbang, pemetaan fluks neutron pada saat reaktor *startup* dan peluruhan isotop bahan bakar serta *refueling* bahan bakar pada teras reaktor.

Pada penelitian ini dilakukan verifikasi perhitungan *benchmark* untuk *zero power physical test* teras reaktor (tahapan ke-5 dari VERA *benchmark*). Parameter yang dianalisis meliputi nilai k-eff dan distribusi faktor daya dengan kondisi teras reaktor *uncontrolled* dan *controlled* (batang kendali Ag-In-Cd /AIC kelompok *bank D* di dalam teras). Perhitungan dilakukan dengan paket program MVP-II[12] dan SRAC2006 modul CITATION<sup>[13]</sup>. Dari analisis hasil perhitungan diharapkan dapat untuk mengetahui: tingkat kesesuaian nilai *benchmark*, tingkat keakuratan dalam menentukan nilai kekritisian teras PWR, dan perbandingan hasil perhitungan dua paket program komputer berbasis metode perhitungan yang berbeda yaitu antara SRAC2006 modul CITATION dan MVP-II.

## METODOLOGI

### Teras Reaktor Watts Bar 1

Seperti yang terlihat pada Gambar 1, teras Watts Bar 1 bentuk geometri 2 dimensi dipandang dari atas tersusun dari 196 perangkat bahan bakar, *baffle* reaktor, *barrel* reaktor, *neutron pad*, *liner* bejana reaktor dan bejana reaktor.



Gambar 1. Teras reaktor PWR bentuk geometri 2 dimensi dipandang dari atas

Masing-masing ukuran dimensi material non bahan bakar teras ditunjukkan pada Tabel 1. Bejana reaktor terbuat dari material *Steel Carbon* (SC508), sedangkan material lainnya terbuat dari *Stainless Steel* (SS304). Moderator dan pendingin reaktor terbuat dari air ringan  $H_2O$  dengan konsentrasi boron sebesar 1300 ppm. Pada saat HZP teras reaktor bertekanan 2250 psi dengan suhu rata-rata densitas moderator masing-masing sebesar 592,8°F dan 0,743 g/cc..

Tabel 1. Data dimensi dan material penyusun teras

No	Nama	Material	Ukuran (cm)	
1.	<i>Baffle</i> reaktor	SS304	tebal=2,85	
2.	<i>Barrel</i> reaktor	SS304	$d_i=187,96$	$d_o=193,68$
3.	<i>Neutron pad</i>	SS304	$d_i=194,64$	$d_o=201,63$
4.	<i>Liner</i> bejana reaktor	SS304	$d_i=219,15$	$d_o=219,71$
5.	Bejana reaktor	SC508	$d_i=219,71$	$d_o=241,70$

Distribusi pengkayaan perangkat bahan bakar  $UO_2$  pada siklus operasi pertama teras Watts Bar 1, ditunjukkan pada Gambar 2 baris pertama, tersusun dari 3 jenis bahan bakar yaitu 2,1wt% (*region* 1), 2,619 wt% (*region* 2), dan 3,1wt% (*region* 3). Bahan bakar terdistribusi secara teratur, dengan bahan bakar pengkayaan tertinggi (3,1 wt%) berada di daerah bagian terluar teras, sedangkan bahan bakar dengan pengkayaan 2,1 wt% dan 2,619 wt% berselang seling di bagian dalam teras. Baris kedua pada Gambar 2 menunjukkan jumlah pyrex yang terdapat dalam perangkat bahan bakar. Pyrex merupakan bahan penyerap yang terbuat dari  $B_2O_3$  dengan posisi penyisipan pada *guide tube* atau tabung pengarah seperti halnya batang kendali. Di dalam gambar tersebut AIC merupakan batang kendali Ag-In-Cd yang disisipkan ke dalam teras reaktor dengan kelompok *bank* D.

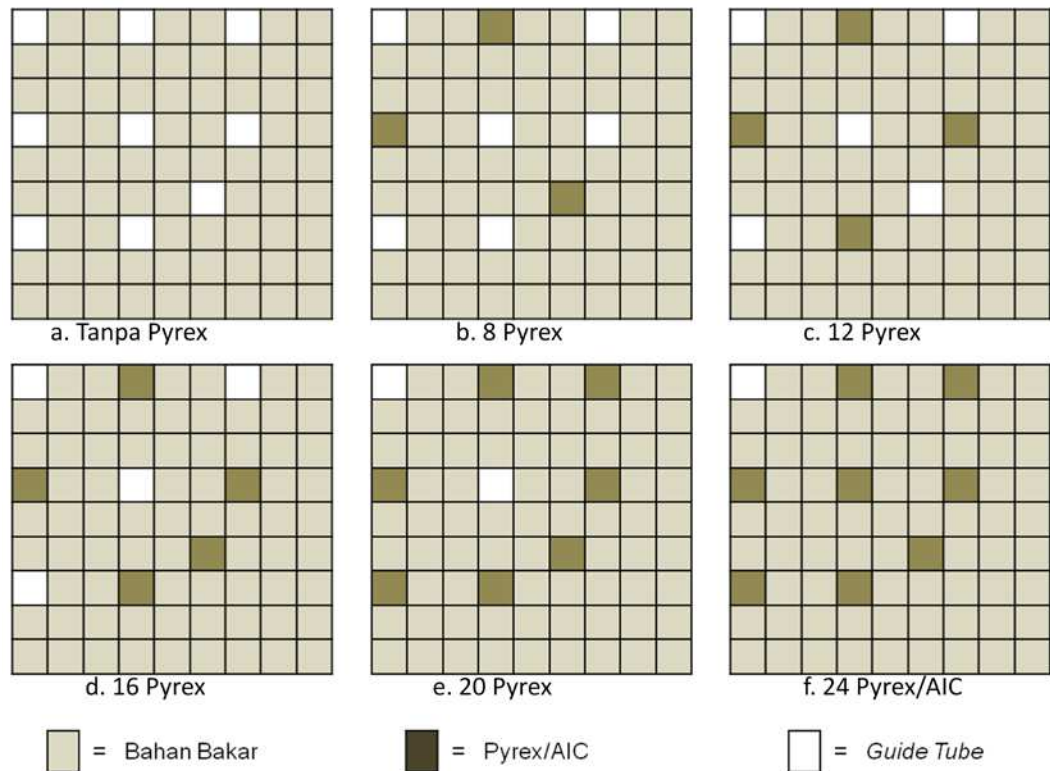
	H	G	F	E	D	C	B	A
8	2.1 AIC	2.6 20	2.1	2.6 20	2.1 AIC	2.6 20	2.1	3.1 12
9	2.6 20	2.1	2.6 24	2.1	2.6 20	2.1	3.1 24	3.1
10	2.1	2.6 24	2.1	2.6 20	2.1	2.6 16	2.1	3.1 8
11	2.6 20	2.1	2.6 20	2.1	2.6 20	2.1	3.1 16	3.1
12	2.1 AIC	2.6 20	2.1	2.6 20	2.6 AIC	2.6 24	3.1	
13	2.6 20	2.1	2.6 16	2.1	2.6 24	3.1 12	3.1	
14	2.1	3.1 24	2.1	3.1 16	3.1	3.1		
15	3.1 12	3.1	3.1 8	3.1	Pengkayaan UO <sub>2</sub> jumlah pyrex			

Gambar 2. Distribusi perangkat bahan bakar pada  $\frac{1}{4}$  bagian teras

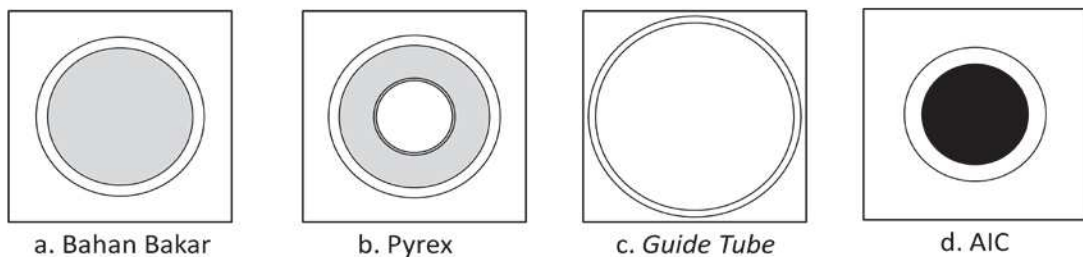
Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan k-eff dan distribusi daya teras Watts Bar 1 pada saat siklus operasi pertama dengan kondisi BOC, HZP dan dengan batang kendali seperti berikut ini.

- *Uncontrolled* yaitu seluruh batang kendali Ag-In-Cd berada di luar teras. Pada kondisi tersebut posisi yang seharusnya terdapat batang kendali digantikan oleh moderator .
- *Controlled* yaitu kelompok batang kendali Ag-In-Cd *bank D* berada di dalam teras. Seperti terlihat pada Gambar 2, maka untuk  $\frac{1}{4}$  bentuk teras akan terdapat 3 posisi perangkat bahan bakar (H-8, D-8 dan H-12) dengan absorber Ag-In-Cd berada di dalam *guide tube*.

Seperti disebutkan diatas, bahwa berdasarkan tingkat pengkayaannya UO<sub>2</sub>, maka perangkat bahan bakar dibagi menjadi 3 jenis: 2,1wt%, 2,619 wt% dan 3,1wt%. Sedangkan berdasarkan jumlah pyrex yang terdapat dalam perangkat bahan bakar tersebut, maka dapat dibedakan menjadi 6 bentuk perangkat bahan bakar yaitu tanpa dan dengan pyrex beturut-turut dengan jumlah 8 , 12, 16, 20 dan 24 pyrex. Bentuk-bentuk perangkat bahan bakar tersebut dengan model  $\frac{1}{4}$  bagian dapat dilihat pada Gambar 3 dengan posisi pyrex di dalam guide tube masing-masing.



Gambar 3. Beberapa jenis bentuk model  $\frac{1}{4}$  bagian perangkat bahan bakar



Gambar 4. Kisi penyusun perangkat bahan bakar

Secara umum kisi sel penyusun perangkat bahan bakar terdiri dari kisi bahan bakar, Pyrex, guide tube/instrument tube dan/atau AIC. Masing-masing bentuk dan ukuran kisi sel penyusun perangkat bahan bakar serta material penyusunnya ditunjukkan pada Gambar 4. dan Tabel 2. Kisi bahan bakar tersusun dari bahan bakar  $UO_2$ , gas He, kelongsong Zr-4 moderator ( $H_2O$  0,743 g/cc, 565K, 2250 psia, boron 1300 ppm). Guide tube/instrument tube tersusun dari kelongsong Zircaloy-4. AIC tersusun dari absorber 80%Ag-15%In-5%Cd dan kelongsong SS304. Sedangkan pyrex tersusun dari *inner tube*, material penyerap pyrex, dan *cladding* SS304.

Tabel 2. Data dimensi dan material kisi penyusun perangkat bahan bakar

No	Nama	Material	Ukuran (cm)	
1.	Bahan bakar : Pellet kelongsong	$UO_2$ Zircaloy-4	$d_i=0,000$ $d_i=0,418$	$d_o=0,4096$ $d_o=0,475$
2.	Guide tube instrument tube	Zircaloy-4 Zircaloy-4	$d_i=0,561$ $d_i=0,559$	$d_o=0,602$ $d_o=0,605$
3.	AIC: absorber kelongsong	Ag-In-Cd SS304	$d_i=0,000$ $d_i=0,386$	$d_o=0,382$ $d_o=0,484$



4.	Pyrex: Inner tube pyrex cladding	SS304 12,5 wt% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SS304	d <sub>i</sub> =0,214 d <sub>i</sub> =0,241 d <sub>i</sub> =0,437	d <sub>o</sub> =0,231 d <sub>o</sub> =0,427 d <sub>o</sub> =0,484
----	---	--	---	---

Tabel 3. Densitas atom isotop material penyusun teras

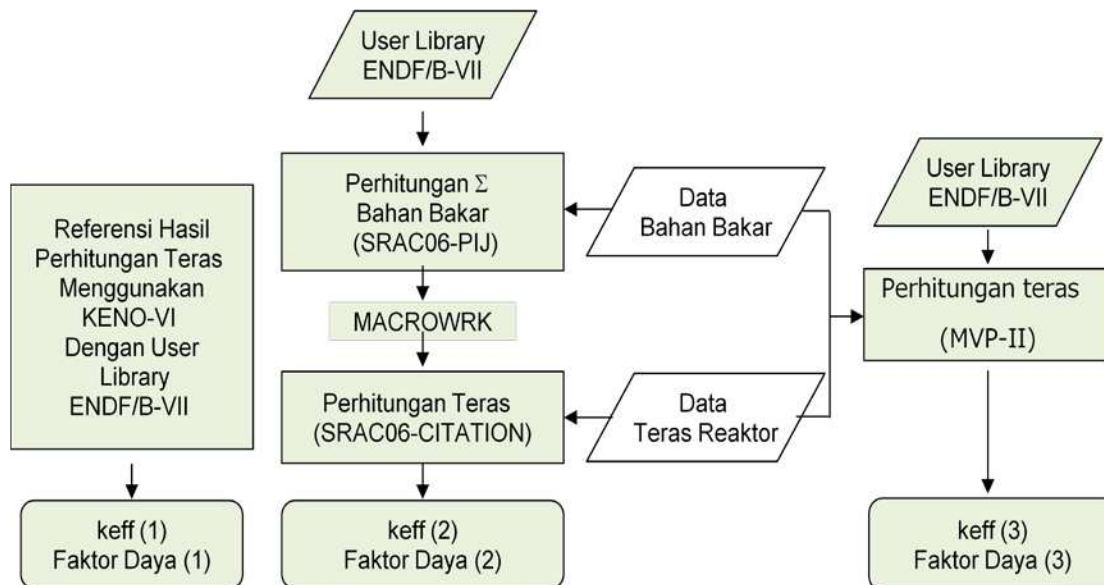
Nama material		Nama material		Nama material	
Isotop	Densitas atom (/barn-cm)	Isotop	Densitas atom (/barn-cm)	Isotop	Densitas atom (/barn-cm)
UO <sub>2</sub> 2,11 w/o		Kelongsong, Zircaloy-4		Pyrex, 12,5 % B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
U-234	4.04814E-06	Cr-50	3.30121E-06	B-10	9.63266E-04
U-235	4.88801E-04	Cr-52	6.36606E-05	B-11	3.90172E-03
U-236	2.23756E-06	Cr-53	7.21860E-06	O-16	4.67761E-02
U-238	2.23844E-02	Cr-54	1.79686E-06	Si-28	1.81980E-02
O-16	4.57591E-02	Fe-54	8.68307E-06	Si-29	9.24474E-04
UO <sub>2</sub> 2,619 w/o		Fe-56	1.36306E-04	Si-30	6.10133E-04
U-234	5.09503E-06	Fe-57	3.14789E-06	Bejana reaktor, CS508	
U-235	6.06709E-04	Fe-58	4.18926E-07	C-12	3.93598E-03
U-236	2.76809E-06	Zr-90	2.18865E-02	Fe-54	4.89841E-03
U-238	2.22663E-02	Zr-91	4.77292E-03	Fe-56	7.68945E-02
O-16	4.57642E-02	Zr-92	7.29551E-03	Fe-57	1.77583E-03
UO <sub>2</sub> 3,10 w/o		Zr-94	7.39335E-03	Fe-58	2.36330E-04
U-234	6.11864E-06	Zr-96	1.19110E-03	Stainless steel, SS304	
U-235	7.18132E-04	Sn-113	4.68066E-06	C-12	3.20895E-04
U-236	3.29861E-06	Sn-114	3.18478E-06	Si-28	1.58197E-03
U-238	2.21546E-02	Sn-115	1.64064E-06	Si-29	8.03653E-05
O-16	4.57642E-02	Sn-116	7.01616E-05	Si-30	5.30394E-05
Gab, Helium gas		Sn-117	3.70592E-05	Cr-50	7.64915E-04
H-4	2.68714E-05	Sn-118	1.16872E-04	Cr-52	1.47506E-02
Absorber, Ag-In-Cd		Sn-119	4.14504E-05	Cr-53	1.67260E-03
Ag-107	2.36159E-02	Sn-120	1.57212E-04	Cr-54	4.16346E-04
Ag-108	2.19403E-02	Sn-122	2.23417E-05	Fe-54	3.44776E-03
Cd-106	3.41523E-05	Sn-124	2.79392E-05	Fe-56	5.41225E-02
Cd-108	2.43165E-05	Hf-174	3.54138E-09	Fe-57	1.24992E-03
Cd-110	3.41250E-04	Hf-176	1.16423E-07	Fe-58	1.66342E-04
Cd-111	3.49720E-04	Hf-177	4.11686E-07	Ni-58	5.30854E-03
Cd-112	6.59276E-04	Hf-178	6.03806E-07	Ni-60	2.04484E-03
Cd-113	3.33873E-04	Hf-179	3.01460E-07	Ni-61	8.88879E-05
Cd-114	7.84957E-04	Hf-180	7.76449E-07	Ni-62	2.83413E-04
Cd-115	2.04641E-04	Moderator, H <sub>2</sub> O, 1300ppm		Ni-64	7.21770E-05
In-113	3.44262E-04	H-1	4.96224E-02		
In-115	7.68050E-03	O-16	2.48112E-02		
		B-10	1.07070E-05		
		B-11	4.30971E-05		

Besarnya densitas atom material baik bahan bakar UO<sub>2</sub> yang terdiri dari 3 jenis pengkayaan (2,11wt%, 2,619 wt% dan 3,10 wt%) maupun non bahan bakar lainnya seperti gas He, moderator H<sub>2</sub>O dengan boron 1300 ppm, kelongsong Zircaloy-4, Pyrex, AIC, SS304, dan CS508 ditunjukkan dalam Tabel 3.

### Alur Perhitungan

Perhitungan nilai k-eff dan distribusi daya dilakukan dengan menggunakan paket program SRAC2006 dan MVP-II. Kedua paket program SRAC2006 dan MVP-II tersebut dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Jepang. Data tampang lintang yang digunakan pada SRAC2006 dan MVP-II sama dengan yang digunakan pada data referensi yaitu ENDF/B-VII.0. Diagram alir

perhitungan k-eff dan faktor daya teras pada kasus *benchmark* fisika teras VERA ini ditunjukkan pada Gambar 5 yang akan dijelaskan seperti dibawah ini.



Gambar 5. Diagram alir perhitungan k-eff dan faktor daya teras

### KENO-VI

Nilai keff dan distribusi daya pada referensi merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan paket program KENO-VI. Paket program KENO-VI merupakan paket program komputer berdasarkan atas metode multigroup energi Monte Carlo untuk pemecahan persamaan Boltzman dalam teori transport. KENO-VI dikembangkan dari versi sebelumnya dengan peningkatan kemampuan perhitungan dengan jumlah jejak partikel yang lebih besar. Untuk perhitungan teras geometri 2 dimensi tersebut digunakan lebih dari  $3E+9$  partikel. Di dalam input KENO-VI, data yang diperlukan antara lain: jenis material, densitas, isotop bahan bakar, bentuk geometri secara eksak, dan opsi pilihan dalam program komputer. Pemodelan dilakukan terhadap satu teras penuh dengan 193 perangkat bahan bakar.

### MVP-II

MVP-II (*Monte Carlo code for Vector Processors*) merupakan paket program komputer vektor berbasis teori transport dengan metode perhitungan partikel neutron yang berdasarkan metode kontinuitas energi Monte Carlo. Data pustakaampang lintang yang disediakan meliputi JENDL-3.1, JENDL-3.2, JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.0, JEFF-2.2 dan JEFF3.0. Input yang diperlukan dalam perhitungan menggunakan MVP-II adalah densitas atom isotop penyusun material, ukuran geometri serta opsi-opsi pilihan yang digunakan di dalam paket program komputer tersebut. Dalam perhitungan teras geometri 2 dimensi digunakan sekitar  $0,46E+9$  partikel. Perhitungan teras dengan MVP-II dilakukan dengan cara pemodelan satu teras penuh bentuk geometri 2 dimensi. Sedangkan distribusi perangkat bahan bakar diasumsikan hanya  $\frac{1}{4}$  bagian teras seperti yang terlihat dalam Gambar 2, sehingga hanya terdapat 57 perangkat bahan bakar. Untuk  $\frac{3}{4}$  bagian teras lainnya merupakan pencerminan ke arah kiri, ke arah atas dan ke arah kiri atas dari 57 perangkat bahan bakar tersebut. Sehingga dalam pembuatan input, maka BODY untuk perangkat bahan bakar hanya terdapat 57 nomor meskipun jumlah seluruh perangkat bahan bakar di dalam teras sebanyak 193 unit. Data pustakaampang lintang yang digunakan adalah ENDF/B-VII.0.

### SRAC2006

Paket program SRAC2006 merupakan paket program komputer yang dapat digunakan untuk menganalisis parameter neutronik berbagai macam tipe dan bentuk teras reaktor. Didalam SRAC2006 terdapat 6 modul yaitu PIJ, TWOTRAN, ANISN, TUD, CITATION dan COREBN/HIST. Data pustakaampang lintang yang disediakan yaitu: JENDL-3.1, JENDL-3.2, JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8,

ENDF/B-VII.0, JEFF-2.2 dan JEFF3.0. Dalam penelitian ini, perhitungan teras dilakukan dengan modul CITATION bentuk geometri 2 dimensi. CITATION merupakan paket program perhitungan yang berbasis teori difusi dengan metode beda hingga dalam pemecahan persamaan diferensial dengan penyisipan tampang lintang makroskopik. Tampang lintang makroskopik diperoleh dari perhitungan perangkat bahan bakar dengan menggunakan modul PIJ. Modul PIJ merupakan salah satu bagian dari paket program SRAC2006 yang berdasarkan pada teori transport neutron dengan pendekatan metode probabilitas tumbukan neutron dalam pemecahan persamaan Boltzman. Energi neutron di kondensasi dari 107 menjadi 8 kelompok energi. Sebagai data pustaka tampang lintang juga menggunakan ENDF/B-VII.0. Pemodelan dilakukan terhadap  $\frac{1}{4}$  bagian teras reaktor bentuk geometri 2 dimensi. Di dalam input perhitungan, teras dimodelkan dalam bentuk  $\frac{1}{4}$  teras dengan batasan sebelah kiri dan belakang bersifat *reflected*, sedangkan bagian depan dan kanan bersifat *extrapolated*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Nilai keff Teras Reaktor

Perbandingan hasil perhitungan nilai keff teras Watts Bar 1 pada awal siklus operasi pertama (kondisi BOC, HZP) dengan posisi *controlled* dan *uncontrolled* batang kendali *Bank D* ditunjukkan pada Tabel 3. Selain nilai k-eff, pada tabel tersebut juga disajikan nilai batang kendali (*control rod worth*) teras pada saat *Bank D* tersebut. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa perbandingan nilai referensi dengan hasil perhitungan baik menggunakan MVP-II maupun SRAC2006 modul CITATION menunjukkan nilai yang hampir sama, atau hanya mengalami perbedaan terbesar 1,13%. Hasil perhitungan dengan MVP-II menunjukkan nilai k-eff yang sedikit lebih besar dari nilai referensi. Sedangkan hasil perhitungan dengan SRAC2006 menunjukkan nilai yang sedikit lebih kecil dari nilai referensi. Meskipun nilai hasil perhitungan dan nilai referensi menunjukkan nilai yang hampir sama, akan tetapi dilihat dari segi kekritisitas teras maka mempunyai makna yang berbeda seperti berikut ini.

Table 4. Perbandingan nilai keff antara KENO-VI, SRAC2006 dan MVP-II

Kondisi	KENO-VI (1)	MPV-II (2)	SRAC2006 (3)	Perbedaan (%)		
				(1)-(2)	(1)-(3)	(2)-(3)
<i>Controlled</i> ( $k_i$ )	0,990067	0,990748	0,980987	-0,000681 (-0,07%)	0,00908 (0,92%)	0,009761 (0,99%)
<i>Uncontrolled</i> ( $k_j$ )	1,002659	1,004070	0,992677	-0,001411 (-0,14%)	0,009982 (0,99%)	0,011393 (1,13%)
$\Delta\rho = (k_i - k_j)/k_i k_j$	-1,27%	-1,34%	-1,20%	0,07%	-0,07%	-0,14%

Dari nilai k-eff referensi hasil perhitungan menggunakan paket program KENO-VI dapat diketahui bahwa teras menunjukkan kondisi subkritis ( $k\text{-eff} < 1,0000$ ) pada saat *controlled* dengan batang kendali *bank D*, dan menjadi kritis ( $k\text{-eff} \approx 1,00000$ ) pada saat *uncontrolled*. Dari tabel tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan menggunakan MVP-II sangat dekat dengan nilai referensi, karena keduanya sama-sama merupakan paket program komputer yang berbasis pada metode Monte Carlo. Sedangkan hasil perhitungan dengan SRAC2006 modul CITATION menunjukkan kondisi kekritisitas yang berbeda dengan nilai hasil perhitungan sebelumnya yang menggunakan KENO-VI dan MVP-II diatas. Hasil perhitungan SRAC2006-CITATION pada kondisi *controlled* batang kendali *Bank D* menunjukkan nilai k-eff yang lebih kecil dari 1,000 atau teras reaktor pada kondisi sub-kritis. Terjadinya perbedaan nilai hasil perhitungan antara KENO-VI (referensi) dan SRAC2006-CITATION tersebut diperkirakan karena metode perhitungan yang berbeda. Karena SRAC2006-CITATION merupakan paket program komputer deterministik yang berbasis pada teori difusi dengan metode beda hingga dalam pemecahan diferensial. Sedangkan KENO-VI merupakan paket program komputer probabilistik yang berbasis pada teori transport dengan metode multigroup energi Monte Carlo dalam pemecahan persamaan Boltzman.



### Distribusi Faktor Daya Radial

Distribusi faktor daya radial pada 1/4 teras hasil perhitungan dengan paket program KENO-VI (referensi), SRAC2006-CITATION, dan MVP-II ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7, masing-masing untuk kondisi *Uncontrolled* dan *Controlled* dengan batang kendali *bank D*. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa distribusi daya radial pada siklus operasi pertama teras PWR Watts Bar 1 cukup rata dengan nilai maksimum sekitar 1,318 (D-12) dan nilai minimum sekitar 0,634 (B-13,C-14) pada saat kritis teras reaktor. Dan pada saat kondisi *controlled* batang kendali Bank D adalah 1,306 (B-10, F-14) dan 0,442 (H-8). Perubahan nilai faktor daya maksimum cukup kecil (1,318→1,306) dengan posisi yang berbeda (D-12→B-10, F-14). Hal tersebut disebabkan karena adanya penyisipan bahan penyerap Ag-In-Cd. Faktor daya maksimum hasil perhitungan KENO-VI dan MVP-II menunjukkan nilai yang menjadi sedikit lebih kecil (1,318→1,306 dan 1,311→1,286) ketika terjadi penyisipan batang kendali. Sedangkan hasil perhitungan dengan SRAC2006-CITATION menunjukkan nilai yang sedikit menjadi lebih besar (1,284→1,338). Hal tersebut diperkirakan karena pengaruh metode perhitungan yang digunakan pada kedua paket program komputer yang berbeda satu dengan lainnya. KENO-VI dan MVP-II bersifat probabilistik, sedangkan SRAC2006-CITATION bersifat deterministik.

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	0,999	0,927	1,012	0,993	1,121	1,053	1,069	0,780
	0,997	0,954	1,003	1,026	1,123	1,089	1,059	0,775
	1,022	0,950	1,031	1,006	1,129	1,050	1,054	0,771
9	0,927	0,993	0,902	1,078	1,054	1,155	1,052	0,891
	0,954	0,985	0,935	1,074	1,093	1,154	1,088	0,858
	0,950	1,017	0,918	1,092	1,060	1,154	1,039	0,882
10	1,012	0,902	1,052	1,034	1,168	1,144	1,088	0,792
	1,003	0,935	1,043	1,067	1,167	1,175	1,077	0,782
	1,031	0,918	1,070	1,046	1,175	1,142	1,075	0,784
11	0,993	1,078	1,034	1,161	1,099	1,152	1,043	0,650
	1,025	1,074	1,067	1,156	1,129	1,136	1,046	0,613
	1,023	1,092	1,046	1,153	1,104	1,147	1,027	0,649
12	1,121	1,054	1,168	1,099	1,316	0,915	0,947	
	1,123	1,092	1,167	1,129	1,284	0,929	0,892	
	1,129	1,060	1,175	1,104	1,311	0,904	0,940	
13	1,053	1,155	1,144	1,152	0,915	0,927	0,634	
	1,089	1,153	1,175	1,136	0,928	0,900	0,580	
	1,050	1,154	1,142	1,147	0,904	0,906	0,626	
14	1,069	1,052	1,088	1,043	0,947	0,634		
	1,058	1,087	1,076	1,045	0,892	0,580		
	1,054	1,039	1,075	1,027	0,940	0,626		
15	0,780	0,891	0,792	0,650				
	0,775	0,858	0,781	0,612				
	0,771	0,882	0,784	0,649				

KENO-VI  
 SRAC2006  
 MVP-II

Gambar 6. Distribusi hasil perhitungan faktor daya pada 1/4 teras kondisi *uncontrolled*

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	0,442	0,742	0,927	0,825	0,557	1,027	1,286	1,005
	0,445	0,752	0,922	0,844	0,573	1,067	1,313	1,036
	0,462	0,769	0,953	0,842	0,567	1,027	1,269	0,997
9	0,742	0,877	0,853	0,991	0,940	1,217	1,272	1,149
	0,752	0,867	0,893	0,994	0,976	1,240	1,359	1,148
	0,769	0,908	0,876	1,011	0,950	1,217	1,255	1,136
10	0,927	0,853	1,036	1,011	1,162	1,242	1,306	1,004
	0,922	0,892	1,042	1,061	1,184	1,313	1,338	1,030
	0,953	0,876	1,059	1,027	1,170	1,238	1,286	0,992
11	0,825	0,991	1,011	1,074	0,947	1,150	1,188	0,795
	0,844	0,994	1,061	1,084	0,981	1,161	1,231	0,779
	0,842	1,011	1,027	1,053	0,951	1,140	1,165	0,792
12	0,557	0,940	1,162	0,947	0,622	0,788	0,996	
	0,572	0,976	1,182	0,980	0,629	0,806	0,962	
	0,567	0,950	1,170	0,951	0,609	0,777	0,987	
13	1,027	1,217	1,242	1,150	0,788	0,856	0,641	
	1,067	1,238	1,311	1,159	0,805	0,841	0,598	
	1,027	1,217	1,238	1,140	0,777	0,836	0,631	
14	1,286	1,272	1,306	1,188	0,996	0,641		
	1,310	1,356	1,336	1,229	0,961	0,598		
	1,269	1,255	1,286	1,165	0,987	0,631		
15	1,005	1,149	1,004	0,795				
	1,034	1,145	1,027	0,777				
	0,997	1,136	0,992	0,792				

KENO-VI  
SRAC2006  
MVP-II

Gambar 7. Distribusi hasil perhitungan faktor daya pada ¼ teras kondisi *controlled*

Secara umum hasil perhitungan distribusi faktor daya radial pada ¼ teras baik dengan paket program komputer KENO-VI, MVP-II maupun SRAC2006 menunjukkan pola yang sama dan dengan posisi faktor daya maksimum dan minimum yang jugasama.

Meskipun kedua paket program yang digunakan dalam perhitungan faktor daya teras *benchmark* yaitu KENO-VI dan MVP-II berbsis pada metode Monte Carlo, dan pustaka data tampang lintang yang digunakan juga sama yaitu ENDF/B-VII.0, tetapi hasil perhitungan menunjukkan perbedaan. Distribusi perbedaan hasil perhitungan faktor daya dengan MVP-II dan nilai referensi ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9 masing-masing untuk kondisi teras *uncontrolled* dan *controlled*. Dari kedua gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin ke tengah teras menunjukkan perbedaan nilai faktor daya hasil perhitungan menggunakan MVP-II yang sedikit lebih besar. Perbedaan nilai faktor daya terbesar ditunjukkan pada posisi G-9 yaitu masing-masing sebesar -0,024 dan -0,031 untuk kondisi teras *uncontrolled* dan *controlled*. Sedangkan dari segi prosentase, maka pada posisi H-8 atau tepat di tengah-tengah teras menunjukkan perbedaan faktor daya terbesar yaitu -4,52%. Hal tersebut diperkirakan karena cara pemodelan dalam membuat input perhitungan dan jumlah maksimum jejak partikel yang digunakan dalam input perhitungan berbeda satu sama lain. Sedangkan pada posisi dimana terdapat faktor daya maksimum hanya menunjukkan perbedaan tipis yaitu 0,005 atau 0,38% (posisi D-12) pada saat teras *uncontrolled*, 0,02% (posisi B-10) dan 1,53% (F-14) pada saat *controlled* batang kendali *Bank D*.

Selanjutnya, pada Gambar 10 dan 11 menunjukkan distribusi perbedaan hasil perhitungan faktor daya antara paket program SRAC2006 modul CITATION dengan nilai referensi (KENO-VI), masing-masing pada kondisi teras *uncontrolled* dan *controlled* batang kendali *bank D*. Berbeda halnya dengan hasil perhitungan dengan MVP-II diatas, perbedaan faktor daya hasil perhitungan dengan SRAC2006-CITATION terbesar ditunjukkan pada posisi ujung diagonal terluar teras (B-13 atau C-14) yaitu sebesar 0,049 (7,73% ) dan 0,043 (6,71%) masing-masing pada kondisi teras *uncontrolled* dan *controlled* batang kendali *bank D*. Perbedaan tersebut diperkirakan selain karena merode perhitungan yang digunakan pada paket program SRAC yang berbasis teori difusi, dan juga karena pemodelan yang dilakukan dalam membuat input perhitungan.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 9 dan 11, perbedaan faktor daya hasil perhitungan dengan MVP-II dan SRAC2006 pada posisi dimana batang kendali disisipkan (D-8, D-12 dan H-12) tidak

mengalami perbedaan yang signifikan. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa *absorber* Ag-In-Cd tidak banyak memberikan pengaruh terhadap perbedaan hasil perhitungan antara KENO-VI, MVP-II dan SRAC2006.

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	-0,023 (-2,30)	-0,023 (-2,48)	-0,019 (-1,88)	-0,013 (-1,31)	-0,008 (-0,71)	0,003 (0,28)	0,015 (1,40)	0,009 (1,15)
9	-0,023 (-2,48)	-0,024 (-2,42)	-0,016 (-1,77)	-0,014 (-1,30)	-0,006 (-0,57)	0,001 (0,09)	0,013 (1,24)	0,009 (1,01)
10	-0,019 (-1,88)	-0,016 (-1,77)	-0,018 (-1,71)	-0,012 (-1,16)	-0,007 (-0,60)	0,002 (0,17)	0,013 (1,19)	0,008 (1,01)
11	-0,030 (-3,02)	-0,014 (-1,30)	-0,012 (-1,16)	0,008 (0,69)	-0,005 (-0,45)	0,005 (0,43)	0,016 (1,53)	0,001 (0,15)
12	-0,008 (-0,71)	-0,006 (-0,57)	-0,007 (-0,60)	-0,005 (-0,45)	0,005 (0,38)	0,011 (1,20)	0,007 (0,74)	
13	0,003 (0,28)	0,001 (0,09)	0,002 (0,17)	0,005 (0,43)	0,011 (1,20)	0,021 (2,27)	0,008 (1,26)	
14	0,015 (1,40)	0,013 (1,24)	0,013 (1,19)	0,016 (1,53)	0,007 (0,74)	0,008 (1,26)		
15	0,009 (1,15)	0,009 (1,01)	0,008 (1,01)	0,001 (0,15)	KENO-VI – MVP-II (%)			

Gambar 8. Distribusi perbedaan hasil perhitungan faktor daya antara MVP-II dan KENO-VI pada teras kondisi *uncontrolled*

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	-0,020 (-4,52)	-0,027 (-3,64)	-0,026 (-2,80)	-0,017 (-2,06)	-0,010 (-1,80)	0,000 (0,00)	0,017 (1,32)	0,008 (0,80)
9	-0,027 (-3,64)	-0,031 (-3,53)	-0,023 (-2,70)	-0,020 (-2,02)	-0,010 (-1,06)	0,000 (0,00)	0,017 (1,34)	0,013 (1,13)
10	-0,026 (-2,80)	-0,023 (-2,70)	-0,023 (-2,22)	-0,016 (-1,58)	-0,008 (-0,69)	0,004 (0,32)	0,020 (1,53)	0,012 (1,20)
11	-0,017 (-2,06)	-0,02 (-2,02)	-0,016 (-1,58)	0,021 (1,96)	-0,004 (-0,42)	0,010 (0,87)	0,023 (1,94)	0,003 (0,38)
12	-0,010 (-1,80)	-0,01 (-1,06)	-0,008 (-0,69)	-0,004 (-0,42)	0,013 (2,09)	0,011 (1,40)	0,009 (0,90)	
13	0,000 (0,00)	0,000 (0,00)	0,004 (0,32)	0,010 (0,87)	0,011 (1,40)	0,020 (2,34)	0,010 (1,56)	
14	0,017 (1,32)	0,017 (1,34)	0,020 (1,53)	0,023 (1,94)	0,009 (0,90)	0,010 (1,56)		
15	0,008 (0,80)	0,013 (1,13)	0,012 (1,20)	0,003 (0,38)	KENO-VI – MVP-II (%)			

Gambar 9. Distribusi perbedaan hasil perhitungan faktor daya antara MVP-II dan KENO-VI pada teras kondisi *controlled*

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	0,013 (1,30)	-0,020 (-2,16)	0,014 (1,38)	-0,030 (3,022)	0,000 (0,00)	-0,033 (-3,13)	0,014 (1,31)	0,007 (0,90)
9	-0,020 (-2,16)	0,014 (1,41)	-0,029 (-3,22)	0,005 (0,46)	-0,038 (-3,61)	0,002 (0,17)	-0,034 (-3,23)	0,035 (3,93)
10	0,014 (1,38)	-0,029 (-3,22)	0,010 (0,95)	-0,034 (-3,29)	-0,001 (-0,09)	-0,033 (-2,88)	0,011 (1,01)	0,010 (1,26)
11	-0,030 (-3,02)	0,006 (0,56)	-0,034 (-3,29)	0,002 (0,17)	-0,034 (-3,09)	0,011 (0,95)	-0,006 (-0,58)	0,036 (5,54)
12	0,000 (0,00)	-0,038 (-3,61)	-0,001 (-0,09)	-0,034 (-3,09)	0,025 (1,90)	-0,020 (-2,19)	0,049 (5,17)	
13	-0,034 (-3,23)	0,003 (0,26)	-0,032 (-2,80)	0,012 (1,04)	-0,019 (-2,08)	0,020 (2,16)	0,049 (7,73)	
14	0,011 (1,03)	-0,033 (-3,14)	0,012 (1,10)	-0,006 (-0,58)	0,050 (5,28)	0,049 (7,73)		
15	0,008 (1,03)	0,035 (3,93)	0,011 (1,39)	0,037 (5,69)	KENO-VI – SRAC2006 (%)			

Gambar 10. Distribusi perbedaan hasil perhitungan faktor daya antara SRAC2006 dan KENO-VI pada teras kondisi *uncontrolled*

	H	G	F	E	D	C	B	A
8	-0,003 (-0,68)	-0,010 (-1,35)	0,005 (0,54)	-0,019 (-2,30)	-0,016 (-2,87)	-0,040 (-3,89)	-0,027 (-2,10)	-0,031 (-3,08)
9	-0,010 (-1,35)	0,010 (1,14)	-0,040 (-4,69)	-0,003 (-0,30)	-0,036 (-3,83)	-0,023 (-1,89)	-0,087 (-6,84)	0,001 (0,09)
10	0,005 (0,54)	-0,039 (-4,57)	-0,006 (-0,58)	-0,050 (-4,95)	-0,022 (-1,89)	-0,071 (-5,72)	-0,032 (-2,45)	-0,026 (-2,59)
11	-0,019 (-2,30)	-0,003 (-0,30)	-0,050 (-4,95)	-0,010 (-0,93)	-0,034 (-3,59)	-0,011 (-0,96)	-0,043 (-3,62)	0,016 (2,01)
12	-0,015 (-2,69)	-0,036 (-3,83)	-0,020 (-1,72)	-0,033 (-3,48)	-0,007 (-1,13)	-0,018 (-2,28)	0,034 (3,41)	
13	-0,040 (-3,89)	-0,021 (-1,73)	-0,069 (-5,56)	-0,009 (-0,78)	-0,017 (-2,16)	0,015 (1,75)	0,043 (6,71)	
14	-0,024 (-1,87)	-0,084 (-6,60)	-0,030 (-2,30)	-0,041 (-3,45)	0,035 (3,51)	0,043 (6,71)		
15	-0,029 (-2,89)	0,004 (0,35)	-0,023 (-2,29)	0,018 (2,26)	KENO-VI – SRAC2006 (%)			

Gambar 11. Distribusi perbedaan faktor daya hasil perhitungan MVP-II dan KENO-VI pada teras kondisi *controlled*

## KESIMPULAN

Telah dilakukan verifikasi perhitungan *benchmark* VERA pada kasus *Zero Power Physical Test* (ZPPT) teras reaktor Watts Bar 1 menggunakan paket program MVP-II dan SRAC2006. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perbedaan nilai  $k_{\text{eff}}$  teras pada kondisi *controlled* dan *uncontrolled* antara referensi dengan MVP-II (-0,07% dan -0,014%) dan SRAC2006 (0,92% dan 0,99%) sangat kecil atau masih dibawah 1%. Perbedaan faktor daya maksimum teras pada kondisi *controlled* dan *uncontrolled* dengan referensi dengan MVP-II adalah 0,38% dan 1,53%, sedangkan dengan SRAC2006 adalah 1,13% dan -2,45%. Dapat dikatakan bahwa kedua paket program komputer menunjukkan hasil perhitungan yang sesuai dengan nilai referensi. Dalam hal penentuan kekritisan teras, maka hasil perhitungan MVP-II lebih konservatif dibandingkan dengan SRAC2006.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian tentang Verifikasi Perhitungan Teras Reaktor *Benchmark* VERA Menggunakan MVP-II Dan SRAC2006 ini dilakukan dalam rangka program MEXT FY2013. Saya ucapkan terima kasih kepada MEXT, Jepang sebagai sponsor penelitian. Dan juga kepada Prof. AKIO Yamamoto, dari Universitas Nagoya, Jepang yang telah memberikan bimbingan selama melakukan kegiatan penelitian tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

1. G..Theler, F..J. Bonetto, A. Clausse. Solution of the 2D IAEA PWR benchmark with the neutronic code MILONGA”, in Actas de la Reunion Anual de la Asociacion Arggwtina de tecnologia Nuclear XXXVIII, 2011. Available from URL; <http://www.talador.com.ar/jeremy/paper/> 2011-aatn -milonga -paper.pdf. Accessed April, 2014.
2. A. Imelda and K. Doddy. Evaluation of the IAEA 3-D PWR benchmark problem NESTLE Code. Risalah Lokakarya Komputasi Dalam Sains Dan Teknologi Nuklir XV, BATAN; Juli 2004.p. 141-154.
3. Tagor Malem Sembiring, Surian Pinem. Validasi paket program NODAL3 untuk kasus statis teras benchmark reaktor PWR. Jurnal Iptek Nuklir GANENDRA. 2012; 15 (2): 82-92.
4. Ali Jahanbin, Hessam Malmir. Kinetic parameters evaluation of PWRs using static cell and core calculation codes. 2012; 41: 110-114.
5. Furqan Arshad, Siraj-ul-Islam Ahmad, Inamul Haq. PWR experimental benchmark analysis using WIMSD and PRIDE Codes. Annals of Nuclear Energy. 2014; 72: 11-19.
6. Steven Douglass, Farzad Rahnema, Johan Margulies. A stylized three dimensional PWR whole core benchmark problem with Gadolinium. Annals of Nuclear Energy. 2010; 37: 1384-1403.
7. Hsien-Chuan Lin, Shung-Jung Yaur, Tzung-Yie Lin, Weng-Sheng Kuo, Jin-Yih Shine, Yu-Lung Huang. Qualification of the Taiwan Power Company’s Pressurized Water Reactor Physics Methods Using CASMO-4/SIMULATE-3. Nuclear Engineering And Design. 2012; 253: 71-76
8. J.M. Paratte, R. Fruh, U. Kasemeyer, M.A. Kalugin, W. Timm, R. Chamla. A benchmark on the calculation of kinetic parameters based on reactivity effect experiments in the CROCUS reactor. Annals of Nuclear Energy. 2006; 33: 739-748
9. Jakko Leppänen, Riku Mattila, Maria Pusa. Validation of the Serpent-ARES codes sequence using the MIT-BEAVRS benchmark – initial core at HZP conditions. Annals of Nuclear Energy. 2014; 69: 212-225.
10. Andrew T. Godfrey. VERA core physics benchmark progression problem specifications-revision 2. Advanced Modeling Applications, Oak Ridge National Laboratory, Consortium for Advanced Simulation of LWRs – CASL U.S. Department of Energy-Nuclear Energy; 2013.
11. D.F. Hollenbach, L.M. Petrie, N.F. Landers. KENO-VI: A general quadratic version of the KENO program. ORNL/TM-2005/39 Version 5.1 Vol.II, Book 3, Sect. F17, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department Of Energy; 2006.
12. Yasunobu Nagaya, Keisuke Okumura, Takamasa Mori, Masayuki Nakagawa. MVP/GMVP II : General purpose Monte Carlo codes for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods. JAERI 1348, Japan Atomic Energy Agency; 2005.



13. Keisuke Okumura, Teruhiko Kugo, Kunio Kaneko and Keichiro Tsuchihashi. SRAC2006; A comprehensive neutronics calculation code system. JAERI-Data/Code 2007-004, Japan Atomic Energy Agency; 2007.